

【学位論文審査の要旨】

1 研究の目的

パワーデバイスを搭載した電力変換装置は、再生可能エネルギーをはじめとする電力、鉄道や自動車などの輸送分野に適用されている。近年では、Si に代わり、SiC や GaN などワイドバンドギャップ半導体を用いたパワーデバイスが開発され、実用化へ向けた検討が急速に進められている。SiC パワーデバイスは Si パワーデバイスに比べて高速スイッチング動作が可能であることから、スイッチング損失を低減できるために電力変換装置の高効率化を期待できる。一方、電力変換回路の内部の配線構造に起因する寄生インダクタンスは、パワーデバイスのスイッチング動作に影響を及ぼすことが広く知られており、特に高速スイッチング動作ではその影響が顕著になる。従来は、寄生インダクタンスの最小化のみが検討されており、その上下限値の範囲を明確にすることは検討されていなかった。そのため、回路構造設計においては電力変換回路内部の配線に寄生するインダクタンスを積極的に設計することはなかった。本研究では、電力変換装置の電圧や電流定格に依らず、統一された寄生インダクタンスの設計手法を開発するとともに、その設計値を実現する配線構造の設計手法を開発することを目的とする。

2 研究の方法と結果

はじめに、電力変換装置の電圧や電流定格に依存しない寄生インダクタンスの規格化手法とその上下限値設計を設計指標として、インピーダンス比を用いる手法を提案した。インピーダンス比は電力変換装置の電圧・電流定格で定まる定格インピーダンスに対する寄生インダクタンスのインピーダンスの割合を示す指標として定義されるものであり、上限値はスイッチング動作時のサージ電圧、下限値は事故時の短絡電流で規定される。また、本規格化手法を適用した上下限値の設計手法を回路解析により検討した。さらに、SiC パワーデバイスを搭載した電力変換装置を用いて実験による妥当性検証を行い、寄生インダクタンスの設計手法を開発する課題を達成した。

次に、寄生インダクタンスがスイッチング損失に与える影響の評価手法を提案した。寄生インダクタンスを考慮した電力変換装置のスイッチング波形を解析することによって、スイッチング損失への影響を明らかにした。特に、ターンオフ損失、ターンオン損失の中でも寄生インダクタンスが影響を与える動作範囲を分離し、本論文で考案したインピーダンス比を用いることでスイッチング損失の増減を解析的に示した。また、SiC パワーモジュールを用いたスイッチング試験結果を示し、実験と解析のスイッチング損失の誤差は 2% であり提案手法の妥当性を明らかにした。本手法により、寄生インダクタンスがスイッチング損失に与える影響を定量的に評価する課題を達成した。

最後に、配線の寄生インダクタンスを考慮した配線構造設計手法について検討した。円形分割とインピーダンス行列を併用した配線の寄生インダクタンスの簡易計算手法を提案し、従来手法に比べて分割数を 1/16 に低減しつつ差異 0.5% 以下であることを示した。また、

本計算手法を用いて配線構造とその寄生インダクタンスの関係性を視覚化可能なインダクタンスマップを提案し、所望の寄生インダクタンスを満たす配線構造の設計手法を開発する課題を達成した。

3 審査の結果

本論文では、電力変換装置を対象として寄生インダクタンス設計手法の提案を行い、その妥当性を実験により明らかにした。特に、電力変換装置の回路構造に依存する寄生インダクタンスの上下限値を明確にすることについては独創性が極めて高い。さらに、配線構造とインダクタンス値の関係性を視覚的に示すインダクタンスマップは、配線構造の初期値の設計指標として非常に有用性が高い。本論文で提案する寄生インダクタンス設計手法は、パワーデバイスの特性だけでなく、電力変換装置の電圧・電流定格に依存しない指標であることから工学的価値を高く評価できる。

以上を総合的に判断した結果、本論文の成果は博士（工学）の学位論文として十分価値があるものと認める。

4 最終試験の結果

本論文の内容および関連分野に関して多角的な視点から審査委員による筆答および口頭の試験を実施した。また、公開の論文発表会を開催して、学内外から多数の出席者を得て多角的な討論を行った。その結果、申請者は論文内容および専門科目・外国語に関して、博士（工学）としての十分な知識・学力があることを確認した。以上の結果を総合的に考慮し、慎重に審議した結果、合格と判定した。